Capítulo 4

Segunda ley de la Termodinámica y Entropia

Índice

4.1. Segunda ley de la termodinámica **78**

4.1.1. Conceptos fundamentales 79

4.1.2. Máquina térmica 80

4.1.3. Máquina refrigeradora y bomba de calor 83

4.1.4. Procesos reversibles y procesos irreversibles 86

4.1.5. El ciclo de Carnot 88

4.2. Problemas Propuestos **94**

4.3. Entropía **95**

La primera ley de la termodinámica establece que el calor es una forma de energía que puede transformarse a otras formas de energía, como la energía mecánica. En términos matemáticos se establece que la integral cíclica del calor es igual a la integral cíclica del trabajo.

$$\oint Q = \oint W$$

En consecuencia, la primera ley establece el principio de conservación de la energía en todos los proceso, pero no aclara la dirección de flujo de calor y del trabajo en el proceso de transformación.

Si describimos a manera de ejemplo lo que un vaso de café caliente se enfría debido a la transmisión del calor del café caliente hacia los alrededores (medio ambiente) y que jamás sucederá lo contrario. Confirmamos que el calor fluye de un cuerpo con mayor temperatura hacia un cuerpo con temperatura más baja, este último aspecto es la cuestión de la segunda ley de la termodinámica.

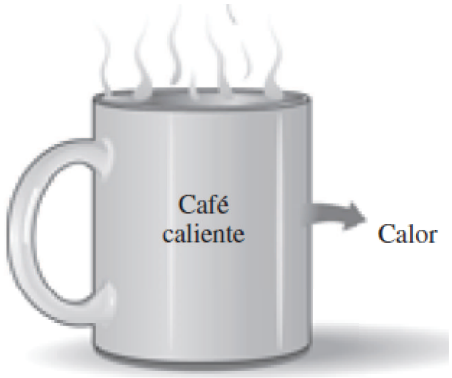


Figura 4.1. Una tasa de café caliente no se pondrá más caliente en una habitación más fría.

La segunda ley de la termodinámica trata de explicar el proceso térmico en determinadas condiciones de temperatura entre dos o mas cuerpos, sustancias etc. haciendo la distinción de que el trabajo es la forma de energía mas valiosa y costosa que el calor, pues no todo el calor puede transformarse en trabajo, debido a la existencia de las irreversibilidades, pero si es posible que todo el trabajo se transforme en calor.

La segunda ley fue intuido por Sadi Carnot (al establecer su ciclo ideal) antes que la primera ley de la termodinámica, fue formulado con mas exactitud por Rudolf Claussius. El descubrimiento de la segunda ley dió un gran impulso a la industria mecánica, en la generación de la energía térmica, como calderos, turbinas de gas, utilización de la energía solar.

4.1. Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica se fundamenta en los siguientes objetivos:

- Estudiar la dirección natura del flujo de calor, de las temperaturas altas hacia las temperaturas bajas.
- Aprovechamiento de este flujo de calor para convertirlo en trabajo, admitiendo la degradación de la energía (calor) en el proceso. La degradación se manifiesta por la disminución de la capacidad de realizar debido a las irreversibilidades existentes en el proceso termodinámico.

Dos axiomas que definen clásicamente la segunda ley son:

Axioma de Clausius. Es imposible que el calor pase, por sí solo, desde una región de menor temperatura (sumidero) hasta otra de mayor temperatura (fuente). A esta axioma se llama también como *axioma de flujo*

De lo anterior se desprende que el calor siempre fluye de mayor a menor temperatura y que no puede existir ningún dispositivo o máquina cuyo único efecto sea la transferencia de calor de una región fría a otra caliente. Del mismo modo, el axioma de Clausius implica que la energía se degrada de manera gradual al realizarse un proceso de transferencia de calor, puesto que su capacidad de hacer trabajo disminuye. Al mismo tiempo, el axioma indica la dirección del proceso, esto es, de mayor a menor temperatura.

Axioma de Kelvin-Planck. Es imposible para cualquier dispositivo, operar de forma cíclica, producir trabajo e intercambiar calor sólo con una región de temperatura constante. A este axioma se le conoce también como axioma de *degradación* (debido a las irreversibilidades). Posteriormente Wilhelm Ostwald concluye, No se puede construir una máquina que trabajando continuamente transforme todo el calor en energía mecánica.

En consecuencia, toda máquina que opere de forma cíclica y que produzca trabajo no sólo debe tomar calor de una región de alta temperatura, sino que también debe disipar una fracción de él hacia una región de menor temperatura. Dado este axioma, se descarta la existencia de máquinas que, de modo permanente, puedan convertir en trabajo la totalidad del calor proveniente de cualquier fuente de energía. De otra manera, esto llevaría a la creación de máquinas con una eficiencia térmica de 100 % (sueño que nunca se ha realizado). Estas máquinas imposibles han recibido el nombre de máquinas de movimiento perpetuo de segunda clase.

4.1.1. Conceptos fundamentales

Foco o deposito térmco Es un sistema de gran cantidad de masa que puede transmitir o al que se puede transmitir calor sin que varíe su temperatura, por ejemplo la atmósfera, el mar, el caldero, cámara refrigerante, etc. que segun sus niveles de función se considera.

Fuente En un foco que transmite calor con naturalidad, sin la ayuda externa.

Sumidero Es un foco que recibe calor, sin la ayuda externa.

Tanto la fuente como el sumidero mantienen constantes su temperatura durante el proceso. Veamos el siguiente esquema.

Del esquema notamos que:

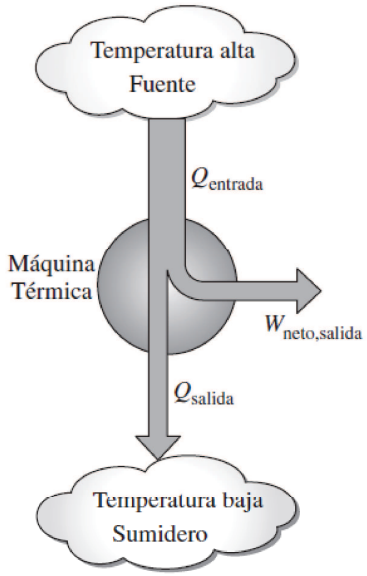


Figura 4.2. Parte del calor que recibe una máquina térmica se convierte en trabajo, mientras que el resto es rechazado a un sumidero.

- Como la temperatura de la fuente es mayor que la del sumidero, entonces $Q_{entrada} > Q_{salida}$.
- $Q_{entrada}$ es el calor que cede la fuente a la maquina térmica.
- Q_{salida} calor que rechaza la maquina térmica y recibe en sumidero (atmósfera, etc).
- $W_{neto,salida}$ es el trabajo neto que se obtiene en la maquina térmica.

4.1.2. Máquina térmica

Es un aparato termodinámico que funciona con el calor fluyente de una fuente a un sumidero, con el fin de transformara una parte de dicho calor a otra forma de energía que es el trabajo.

Las máquinas térmicas difieren bastante entre sí, pero es posible caracterizarlas a todas de la siguiente manera:

1. Reciben calor de una fuente a temperatura alta (energía solar, horno de petróleo, reactor nuclear, etcétera).
2. Convierten parte de este calor en trabajo (por lo general en la forma de una flecha rotatoria).
3. Rechazan el calor de desecho hacia un sumidero de calor de baja temperatura (la atmósfera, los ríos, etcétera).
4. Operan en un ciclo.

El dispositivo productor de trabajo que mejor se ajusta a la definición de una máquina térmica es la *central eléctrica de vapor*, la cual es una máquina de combustión externa, es decir, la combustión se lleva a cabo fuera de la máquina y la energía térmica liberada durante este proceso se transfiere al vapor como calor. El esquema de una central eléctrica de vapor se muestra en la figura:

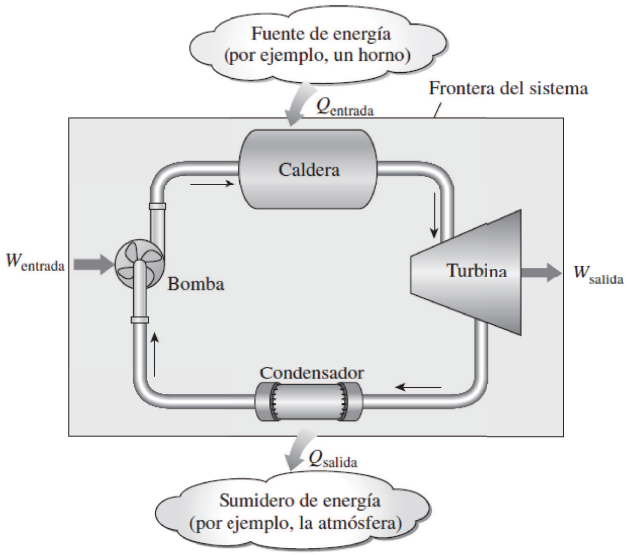


Figura 4.3. Esquema de una central eléctrica de vapor.

Observe que las direcciones de las interacciones de calor y trabajo se indican mediante los subíndices $entrada$ y $salida$. Por lo tanto, las cuatro cantidades descritas son *positivas* siempre.

La salida de trabajo neto de esta central eléctrica de vapor es la diferencia entre su salida de trabajo total y su entrada de trabajo total:

$$W_{neto,salida} = W_{salida} - W_{entrada} \quad \text{(kJ)} \tag{4.1}$$

Recuerde que para que un sistema cerrado experimente un ciclo, el cambio de energía interna ΔU es cero y, en consecuencia, la salida de trabajo neto del sistema también es igual a la transferencia neta de calor hacia el sistema:

$$W_{neto,salida} = Q_{entrada} - Q_{salida} \quad \text{(kJ)} \tag{4.2}$$

Para las máquinas térmicas, la salida deseada es la de trabajo neto, mientras que la entrada que requieren es la cantidad de calor suministrado al fluido de trabajo. Entonces la **eficiencia térmica (η_t)** de una máquina térmica se puede expresar como:

$$\text{eficiencia térmica} = \frac{\text{Salida de trabajo neto}}{\text{Entrada de calor total}} \quad \Rightarrow \quad \eta_t = \frac{W_{neto,salida}}{Q_{entrada}} \tag{4.3}$$

dado que, $W_{neto,salida} = Q_{entrada} - Q_{salida}$

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_{salida}}{Q_{entrada}} \tag{4.4}$$

Los dispositivos cíclicos de interés práctico como las máquinas térmicas, los refrigeradores y las bombas de calor operan entre un medio de alta temperatura (o depósito) a temperatura T_H y otro de baja temperatura (o depósito) a temperatura T_L.

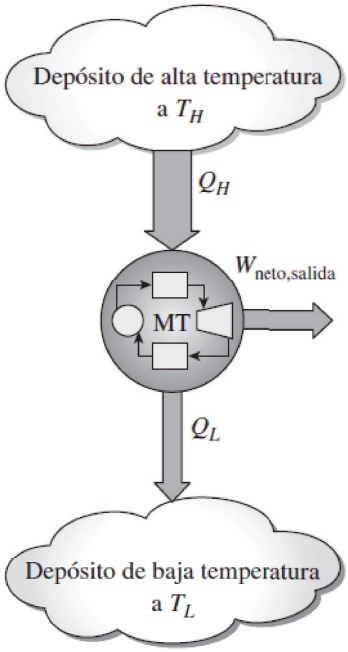


Figura 4.4. Esquema de una máquina térmica.

Para uniformar el tratamiento de máquinas térmicas, refrigeradores y bombas de calor, se definen estas dos cantidades:

$Q_H =$ magnitud de la transferencia de calor entre el dispositivo cíclico y el medio de alta temperatura a temperatura T_H.

$Q_L =$ magnitud de la transferencia de calor entre el dispositivo cíclico y el medio de baja temperatura a temperatura T_L.

Observe que Q_L y Q_H están definidas como magnitudes, por lo tanto son cantidades **positivas**. La dirección de Q_H y Q_L se determina fácilmente mediante inspección. Entonces, el trabajo neto y las relaciones de eficiencia térmica para cualquier máquina térmica también se pueden expresar como

$$W_{neto,salida} = Q_H - Q_L \tag{4.5}$$

y

$$\eta_t = \frac{W_{neto,salida}}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \tag{4.6}$$

La eficiencia térmica de una máquina térmica siempre es menor a la unidad porque Q_L y Q_H se definen como cantidades positivas.

Ejercicio 4.1 Se transfiere calor a una máquina térmica desde un horno a una tasa de 80 MW. Si la tasa de rechazo de calor hacia un río cercano es 50 MW, determine la salida de potencia neta y la eficiencia térmica para esta máquina térmica.

4.1.3. Máquina refrigeradora y bomba de calor

Son aparatos que operan en un ciclo termodinámico transmiten calor de un foco de baja temperatura a un de alta temperatura, mediante la ayuda de un trabajo desde el exterior.

Caso de la máquina refrigeradora

El objetivo es enfriar mas a la región desde donde estamos sacando (extrayendo) calor, su rendimiento se aprecia mediante un coeficiente de performance (COP_R) de la refrigeranción.

Los refrigeradores, como las bombas de calor, son dispositivos cíclicos. El fluido de trabajo utilizado en el ciclo de refrigeración se denomina **refrigerante**. El ciclo de refrigeración que se utiliza con mayor frecuencia es el ciclo de refrigeración por compresión por vapor, en el que intervienen cuatro componentes principales: un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador, como se ilustra en la figura

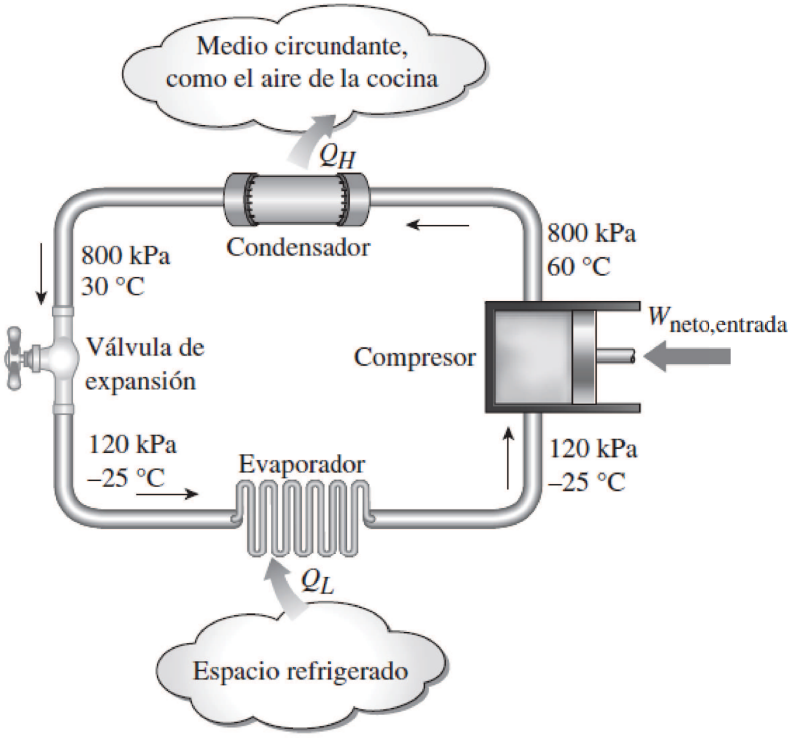


Figura 4.5. Componentes básicos de un sistema de refrigeración y sus condiciones de operación características.

La eficiencia de un refrigerador se expresa en términos del coeficiente de desempeño (COP, siglas de coefficient of performance), el cual se denota mediante COP_R. El objetivo de un refrigerador es remover calor (Q_L) del espacio refrigerado. Para lograr este objetivo, se requiere una entrada de trabajo de $W_{neto,entrada}$.

$$COP_R = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_L}{W_{neto,entrada}} \tag{4.7}$$

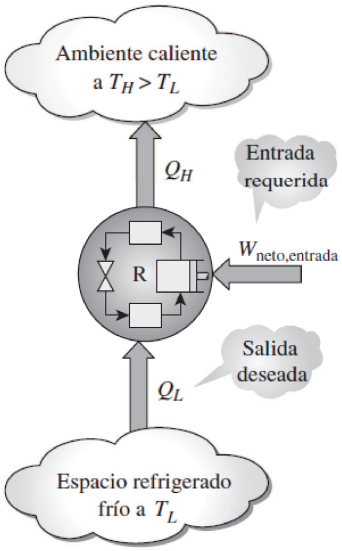


Figura 4.6. El objetivo de un refrigerador es eliminar Q_L de un espacio enfriado.

El principio de conservación de la energía para un dispositivo cíclico requiere que:

$$W_{neto,entrada} = Q_H - Q_L \tag{4.8}$$

Entonces, la relación del COP se convierte en:

$$COP_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \tag{4.9}$$

Caso de la bomba de calor

El objetivo es calentar más a la región a donde estamos entregando calor, cuya temperatura es mayor ó mucho mayor que la región de donde estamos extrayendo calor, y su rendimiento está representado por el coeficiente de performance de la bomba COP_{HP}

La medida de desempeño de una bomba de calor también se expresa en términos del coeficiente de desempeño COP_{HP}, definido como:

$$COP_{HP} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_H}{W_{neto,entrada}} \tag{4.10}$$

que también se puede expresar como:

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \tag{4.11}$$

para valores fijos de Q_L y Q_H se tiene que:

$$COP_{HP} = COP_R + 1 \tag{4.12}$$

para valores fijos de Q_L y Q_H. Esta relación indica que el coeficiente de desempeño de una bomba de calor siempre es mayor que la unidad puesto que COP_R es una cantidad positiva. Es decir, una bomba de calor funcionará, en el peor de los casos, como un calentador de

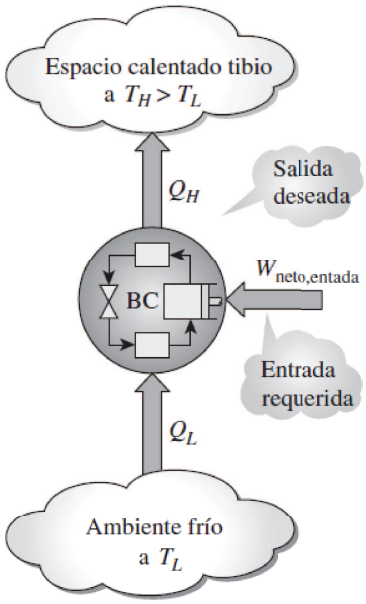
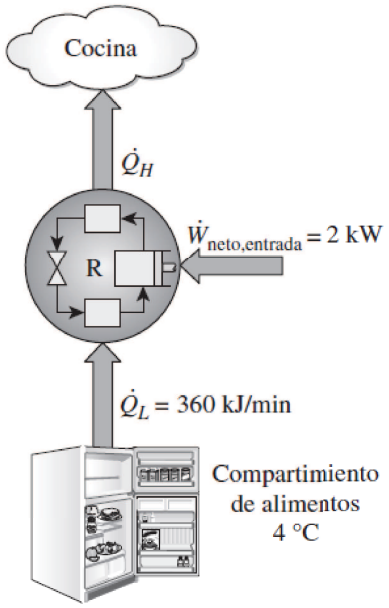


Figura 4.7. El objetivo de una bomba de calor es suministrar calor Q_H hacia el espacio más caliente.

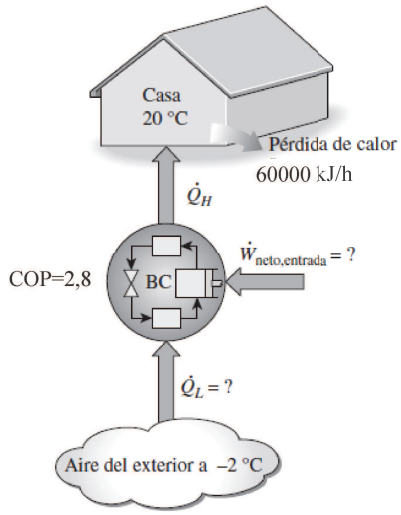
resistencia al suministrar tanta energía como requiera la casa. Sin embargo, en realidad parte de Q_H se va al aire exterior a través de la tubería y otros dispositivos, por lo que el COP_{HP} podría ser menor que la unidad cuando la temperatura del aire exterior es demasiado baja.

Los acondicionadores de aire son básicamente refrigeradores cuyo espacio refrigerado es una habitación o un edificio en lugar de un compartimiento de alimentos. Una unidad de acondicionador de aire tipo ventana enfría una habitación al absorber calor del aire de la habitación y descargarlo hacia el exterior. Esta misma unidad puede usarse como bomba de calor en invierno instalándola hacia atrás.

Ejercicio 4.2 El compartimiento para comida de un refrigerador, que se muestra en la figura , se mantiene a 4 ºC al extraer calor de éste a una tasa de 360 kJ/min. Si la entrada de potencia requerida al refrigerador es de 2 kW, determine a) el coeficiente de desempeño del refrigerador y b) la tasa de rechazo de calor hacia la habitación que aloja al refrigerador.



Ejercicio 4.3 Se utiliza una bomba de calor para satisfacer los requerimientos de calefacción de una casa y mantenerla a 20 °C. Se estima que la casa pierde calor a una tasa de 60 000 kJ/h en un día en el que la temperatura del aire exterior desciende a −2 °C. Si la bomba de calor en estas condiciones tiene un COP de 2.8, determine a) la potencia consumida por la bomba de calor y b) la tasa a la que se extrae calor del aire frío exterior.



4.1.4. Procesos reversibles y procesos irreversibles

Un proceso reversible se define como un proceso que se puede invertir sin dejar ningún rastro en los alrededores (Fig. 4.8). Es decir, tanto el sistema como los alrededores vuelven a sus estados iniciales una vez finalizado el proceso inverso. Esto es posible sólo si el intercambio de calor y trabajo netos entre el sistema y los alrededores es cero para el proceso combinado (original e inverso). Los procesos que no son reversibles se denominan procesos irreversibles.

Un proceso es REVERSIBLE cuando en cada momento de la transformación, las temperaturas y presiones (dos propiedades) están en equilibrio, de tal modo que una variación

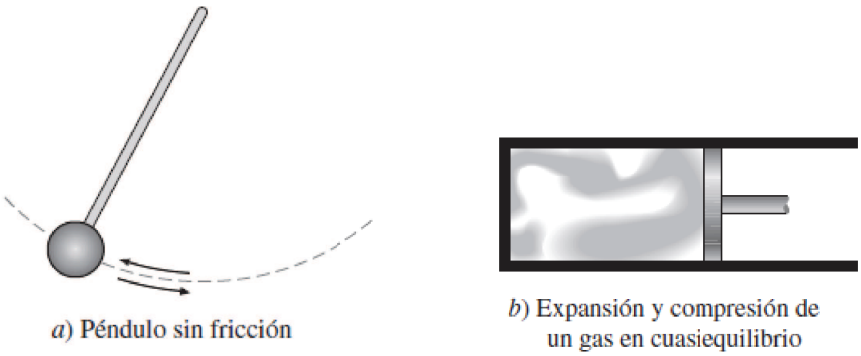


Figura 4.8. Dos procesos reversibles comunes.

infinitesimal en aquellas variables determina el sentido de la transformación. Es decir que la energía invertido en tal transformación puede ser recuperado sin pérdidas en el cambio. Lo contrario se llama proceso IRREVERSIBLE, ya que su realización supone desequilibrio finito de una de las variables respecto del valor que le correspondería par el equilibrio perfecto. En conclusión: **Para procesos reversibles podemos describir el camino seguido en el proceso, mientras que para los procesos irreversibles no, solo al inicio y al final**.

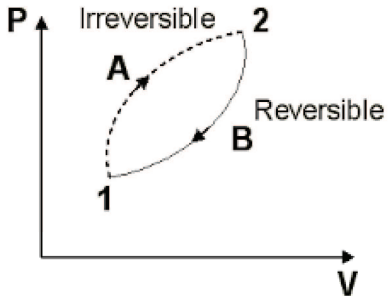


Figura 4.9. Proceso reversible e irreversible.

La linea 2-B-1 indica al proceso reversible. La linea 1-A-2 indica el proceso irreversible.

Un proceso reversible para un sistema, volumen de control o ciclo, se define como un proceso que una vez que se efectúa, puede invertirse sin ningún cambio, ni el sistema, volumen de control o ciclo, tampoco en el medio ambiente.

Todo proceso real es irreversible cumpliendose el Axioma de Kelvin-Plank, por ejemplo: Cuando se realiza un proceso térmico de un estado inicial y otro final, existe un desgaste de energía en el camino, de tal modo que si se invierte el proceso, jamas recuperaráel total de su energía inicial. Luego, todo proceso natural es irreversible.

Los factores de irreversibilidad son: Las fuerzas de fricción, expanción adiabática, transmisión de calor a través de una diferencia de temperaturas altas, mezcla de sustancias diversas, la velocidad de proceso, etc, sin embargo, el grado de irreversibilidad de un proceso, no podemos fijar a priori, es decir no lo podemos deducir teóricamente, pues depende de muchos factores de precisar, pero principalmente de la velocidad del proceso. En general **a mayor velocida mayor irreversibilidad, pudiendo considerarse como reversible a los**

proceso infinitamente lentos

4.1.5. El ciclo de Carnot

Es un ciclo reversible constituido por cuatro procesos reversibles. veáse el siguiente diagrama:

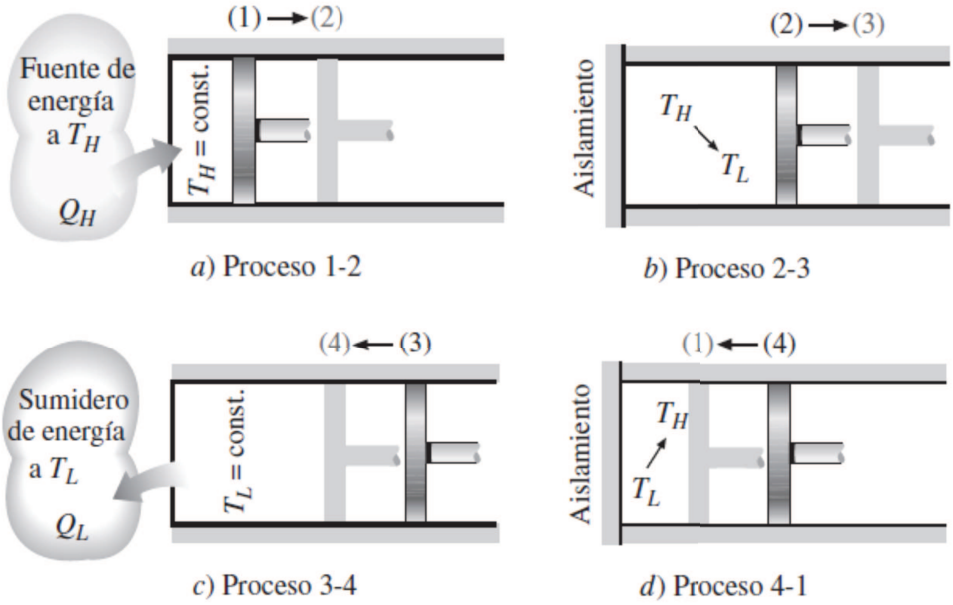


Figura 4.10. Procesos en el ciclo de Carnot.

Expansión isotérmica reversible (proceso 1-2, T_H =constante).
Expansión adiabática reversible (proceso 2-3, la temperatura disminuye de T_H a T_L).
Compresión isotérmica reversible (proceso 3-4, T_L =constante).
Compresión adiabática reversible (proceso 4-1, la temperatura sube de T_L a T_H).

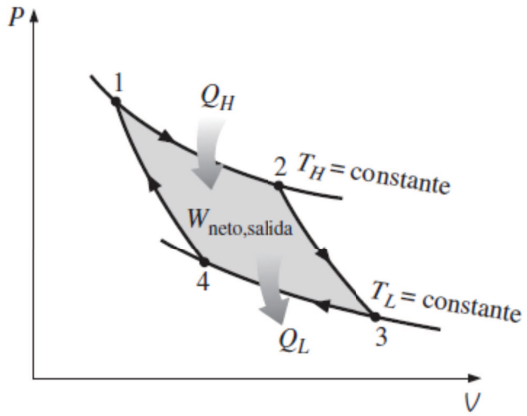


Figura 4.11. Diagrama P-V de un ciclo de Carnot.

1-2 y 3-4, son procesos isotérmicos reversibles.
2-3 y 4-1, son procesos adiabáticamente reversibles,llamados tambien ISOENTRÓPICOS.

La máquina térmica teórica que opera en el ciclo de Carnot se llama máquina térmica de Carnot, cuyo ciclo se compone de cuatro procesos reversibles, dos isotérmicos y dos adiabáticos, y que es posible llevar a cabo en un sistema cerrado o de flujo estacionario.

Toda maquina de Carnot está constituido por proceso reversibles, pero, NO todo proceso o ciclo reversible constituye una maquina reversible constituye una máquina térmica de Carnot, ya que no necesariamente un ciclo está compuesta por dos isotermas y dos adiabáticas.

Axiomas de Carnot

a) La eficiencia de una maquina de Carnot (eficiencia térmica) real (irreversible) es menor que la de una máquina térmica ideal (reversible), si ambas funcionan entre los mismos niveles de temperatura (fuente-sumidero).

$$\eta_{ter,irrev} < \eta_{ter,rev} \tag{4.13}$$

donde: $\eta_{ter,irrev} = \dfrac{W_{ter,irrev}}{Q_H}$ y $\eta_{ter,rev} = \dfrac{W_{ter,rev}}{Q_H}$

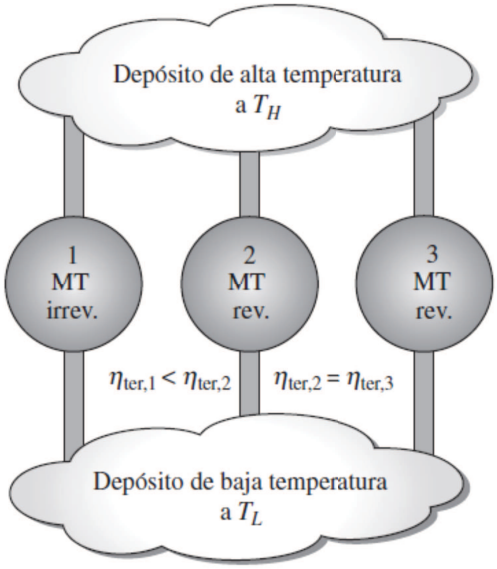


Figura 4.12. Axiomas de Carnot.

b) Si dos ó más máquinas reversible trabajan entre los mismos focos, dichas maquinas tienen la misma eficiencia. Por ejemplo en la figura 4.12 se tiene que:

$$\eta_{ter,2} = \eta_{ter,3} \tag{4.14}$$

Escala termodinámica de temperatura absoluta

Una escala de temperatura que es independiente de las propiedades de las sustancias utilizadas para medir la temperatura se denomina **escala termodinámica de temperatura**, la cual ofrece grandes ventajas en los cálculos termodinámicos. Dado que la eficiencia térmica de una maquina de Carnot depende únicamente de las temperaturas absolutas de la

fuente y del sumidero, la operación de cualquier máquina extremadamente reversible, constituye un medio para establecer una escala de temperaturas absolutas. Lord Kelvin propuso primero que el calor esta para definir una escala de temperatura termodinámica como:

$$\left(\frac{Q_H}{Q_L}\right)_{rev} = \frac{T_H}{T_L} \tag{4.15}$$

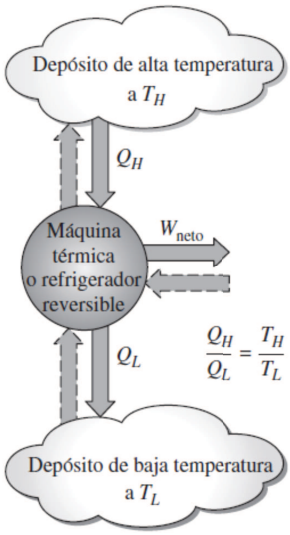


Figura 4.13. Para ciclos reversibles, la relación de transferencia de calor Q_H/Q_L se puede reemplazar por la relación de temperatura absoluta T_H/T_L.

Para máquina Térmica

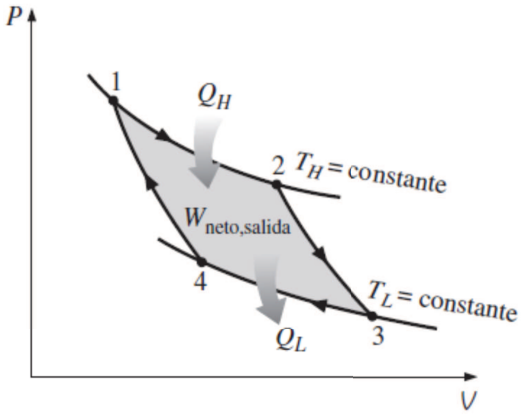


Figura 4.14. Diagrama $P - V$ de un ciclo de Carnot.

$$\eta_{ter,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \tag{4.16}$$

Las eficiencias térmicas de las máquinas térmicas reales y reversibles que operan entre los mismos límites de temperatura se comparan:

$$\eta_{ter} = \begin{cases} < \eta_{ter,rev} & \text{máquina térmica irreversible} \\ = \eta_{ter,rev} & \text{máquina térmica reversible} \\ > \eta_{ter,rev} & \text{máquina térmica imposible} \end{cases} \tag{4.17}$$

Para máquina refrigeradora o bomba de calor

Un refrigerador o una bomba de calor, que opera en el ciclo inverso de Carnot, se llama refrigerador de Carnot o bomba de calor de Carnot. En la máquina refrigeradora:

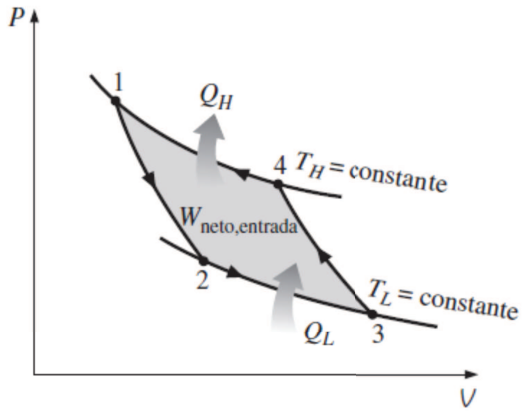


Figura 4.15. Diagrama $P - V$ de un ciclo inverso de Carnot.

$$COP_{R,rev} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} \tag{4.18}$$

En bomba e calor:

$$COP_{HP,rev} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} \tag{4.19}$$

Éstos son los coeficientes de desempeño más altos que puede tener un refrigerador o una bomba de calor que opera entre los límites de temperatura T_L y T_H. Los refrigeradores o bombas de calor reales que operan entre estos límites de temperatura (T_L y T_H) tienen menores coeficientes de desempeño.

Los coeficientes de desempeño de refrigeradores reales y reversibles que operan entre los mismos límites de temperatura se pueden comparar como sigue:

$$COP_R = \begin{cases} < COP_{R,rev} & \text{Refrigeradora irreversible} \\ = COP_{R,rev} & \text{Refrigeradora reversible} \\ > COP_{R,rev} & \text{Refrigeradora imposible} \end{cases} \tag{4.20}$$

Si se reemplazan los COP_R por COP_{HP} en la ecuación anterior se obtiene una relación similar para las bombas de calor.

Desigualdad de Clausius

Es un corolario a consecuencia de la Segunda ley de la Termodinámica y es válida para todo proceso termodinámico (sistemas, volumen de contro, ciclos, etc) y trata sobre la degradación de la energía en todo proceso en términos artificiales o naturales del Universo. Este comportamiento termodinámico nos ayuda a verificar la segunda ley de la Termodinámica, estableciendo los siguiente:

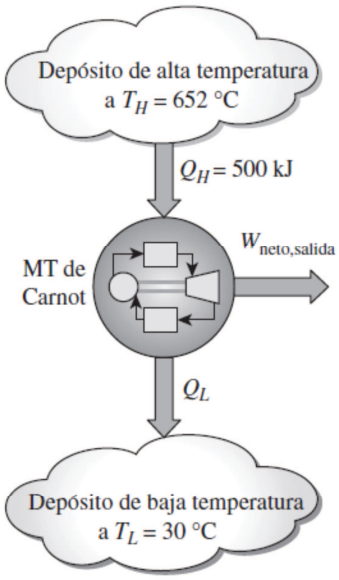
Que la integral cíclica de la relación dQ/T o dq/T es siempre menor que cero para ciclos irreversible (reales) y es igual a cero para ciclos reversibles (ideales).

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad \oint \frac{dq}{T} \leq 0 \tag{4.21}$$

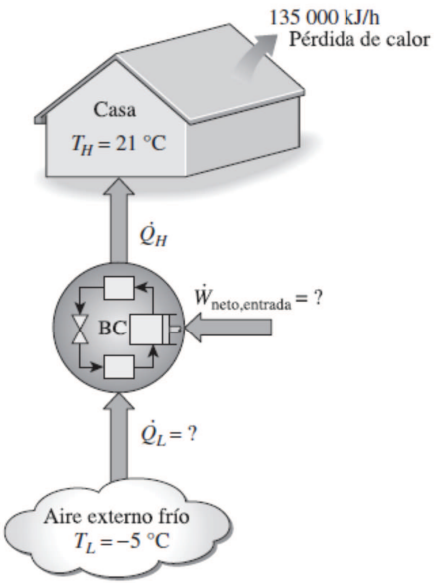
$$\oint \frac{Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_{L,rev}}{T_L} = 0 \;\; (proceso\, reversible) \tag{4.22}$$

$$\oint \frac{Q}{T} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_{L,irrev}}{T_L} < 0 \;\; (proceso\, reversible) \tag{4.23}$$

Ejercicio 4.4 Una máquina térmica de Carnot, como la mostrada en la figura, recibe 500 kJ de calor por ciclo desde una fuente de alta temperatura a 652 ºC y rechaza calor hacia un sumidero de baja temperatura a 30 ºC. Determine a) la eficiencia térmica de esta máquina de Carnot y b) la cantidad de calor rechazada por ciclo hacia el sumidero.



Ejercicio 4.5 Se utilizará una bomba de calor para calentar una casa durante el invierno, como se muestra en la figura. La casa se mantiene a 21 ºC todo el tiempo y se estima que pierde calor a razón de 135000 kJ/h cuando la temperatura exterior desciende a -5 ºC. Determine la potencia mínima requerida para impulsar esta bomba de calor.



Ejercicio 4.6 Dos máquinas de Carnot 1 y 2 operan en serie. La máquina 1 recibe calor de una región a 500 ºC y lo descarga hacia una región que se encuentra a temperatura T. La máquina 2 toma el calor liberado por la máquina 1 y disipa calor a una región que se encuentra a 30 ºC. Calcule la temperatura T y la eficiencia térmica de cada máquina si a) El trabajo desarrollado por ambas es el mismo. b) La eficiencia térmica de ambas es igual.

Ejercicio 4.7 Para calentar un edificio durante el invierno se emplea una bomba térmica de Carnot. El aire exterior se encuentra a 10 ºC y se desea mantener el interior del edificio a 25 ºC. Mediante un análisis previo de transferencia de calor, se estima que las pérdidas de calor del edificio hacia el exterior son de aproximadamente 50 000 kcal/h. a) Determine el flujo de calor absorbido por la bomba. b) Determine la potencia requerida para lograr el calentamiento. e) Si la calefacción se hiciera mediante calentadores eléctricos, calcule la potencia que requerirían.

Ejercicio 4.8 En el análisis preliminar del costo de operación de una planta nuclear de 100000 kW se requiere una estimación de la cantidad de agua de enfriamiento necesaria. Para estos estudios preliminares la planta puede aproximarse a una máquina de Carnot que opera entre temperaturas de 350 y 60 ºC. Si el incremento de temperatura que sufre el agua de enfriamiento se limita a 25 ºC, estime la cantidad de agua de enfriamiento necesaria.

Ejercicio 4.9 En la máquina térmica es esquematizada:
a) Determine si la máquina es reversible, irreversible o imposible.
b) Consteste a la misma pregunta cuando $W = 180$ kW.

Ejercicio 4.10 Determine la máxima temperatura ideal que puede tener el sumidero con que trabaja una maquina térmica reversible que tiene una fuente a 800 ºC y que trabaja con una eficiencia de 40 %.

4.2. Problemas Propuestos

Problema 4.1 ¿Una máquina térmica que tiene una eficiencia térmica de 100 por ciento viola necesariamente a) la primera ley y b) la segunda ley de la termodinámica? Explique.

Problema 4.2 Considere una cacerola de agua que se calienta a) colocándola en una parrilla eléctrica y b) colocando un elemento calentador en el agua. ¿Cuál de los dos métodos es la manera más eficiente de calentar el agua? Explique.

Problema 4.3 Una máquina térmica con una eficiencia térmica de 40 por ciento rechaza 1 000 kJ/kg de calor. ¿Cuánto calor recibe? Respuesta: 1 667 kJ/kg

Problema 4.4 Una planta termoeléctrica con una generación de potencia de 150 MW consume carbón a razón de 60 toneladas/h. Si el poder calorífico del carbón es 30000 kJ/kg, determine la eficiencia total de esta planta. Respuesta: 30.0 por ciento

Problema 4.5 Se deben enfriar plátanos de 24 a 13 ºC a razón de 215 kg/h, mediante un sistema de refrigeración. La entrada de potencia al refrigerador es 1.4 kW. Determine la tasa de enfriamiento, en kJ/min, y el COP del refrigerador. El calor específico de los plátanos arriba del punto de congelación es 3.35 kJ/kg ºC.

Problema 4.6 Se usa una bomba de calor para mantener una casa a una temperatura constante de 23 ºC. La casa pierde calor hacia el aire exterior a través de las paredes y las ventanas a razón de 60000 kJ/h, mientras que la energía generada dentro de la casa por las personas, las luces y los aparatos domésticos es de 4000 kJ/h. Para un COP de 2.5, determine la potencia necesaria para la operación de bomba de calor. Respuesta: 6.22 kW

Problema 4.7 La estructura de una casa es tal que pierde calor a razón de 3 800 kJ/h por ºC de diferencia entre el interior y el exterior. Se usa una bomba de calor que necesita una entrada de potencia de 4 kW para mantener la casa a 24 ºC. Determine la temperatura exterior más baja para la cual esta bomba puede satisfacer las necesidades de calefacción de esta casa. Respuesta: −13.3 ºC

Problema 4.8 La etiqueta de *Guía energética* de un refrigerador dice que el refrigerador consumirá electricidad con un costo de $ 74 por año con uso normal si el costo de electricidad es de $0.07/kWh. Si la electricidad que consume el foco de iluminación es despreciable y el refrigerador consume 300 W cuando trabaja, determine la fracción del tiempo durante la cual trabajará el refrigerador.

Problema 4.9 La iluminación interior de los refrigeradores normalmente se hace mediante lámparas incandescentes cuyos interruptores se actúan al abrir la puerta del refrigerador. Considere un refrigerador cuyo foco de 40 W permanece encendido aproximadamente 60 h por año. Se propone reemplazar el foco por otro más eficiente que consume sólo 18 W pero tiene un precio de adquisición e instalación de $25. Si el refrigerador tiene un coeficiente de

desempeño de 1.3 y el costo de la electricidad es de 8 centavos de dólar por kWh, determine si los ahorros de energía por foco propuesto justifican su costo.

4.3. Entropía

Es una magnitud de estado calorífico o una medida (o factor) de la transformación de la energía calorífica en mecánico o viceversa, que surge como un postulado de la segunda ley de la termodinámica y se establece a partir de la desigualdad de CLAUSIUS:

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0 \tag{4.24}$$

donde $\frac{dQ}{T}$ es una diferencial exacta de una cierta función que representamos en lo sucesivo con S llamado por Clausius, ENTROPÍA, cuyo significado literal es: girar o evolucionar.

$$dS = \frac{dQ}{T} \tag{4.25}$$

Las unidades de la entropía S es kJ/K y de la entropía específica $s = S/m$, sus unidades kJ/kgK

En un proceso reversible (proceso de 1 a 2), en un ciclo cerrado se cumple:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 = \oint_{1A}^{2A} \frac{dQ}{T} + \oint_{2B}^{1B} \frac{dQ}{T} \tag{4.26}$$

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0 = \oint_{1A}^{2A} \frac{dQ}{T} + \oint_{2C}^{1C} \frac{dQ}{T} \tag{4.27}$$

igualando 4.26 y 4.27, se concluye:

$$\oint_{2B}^{1B} \frac{dQ}{T} = \oint_{2C}^{1C} \frac{dQ}{T} \tag{4.28}$$

Esta ultima ecuación nos indica que $S = \frac{dQ}{T}$ es independiente de la trayectoria, en consecuencia, la entropía (S) es una propiedad de un sistema o volumen de control y al depender de la cantidad de la masa en tratamiento, se encuentra entre las propiedades EXTENSIVAS. De allí que su variación del estado 1 al estado 2 a lo largo de una transformación reversible es:

$$\int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \;\Rightarrow\; \Delta S_{1-2} = \frac{Q_{1-2}}{T} \tag{4.29}$$

$$Q_{1-2} = mq_{1-2} = \Delta S_{1-2}T \;\Rightarrow\; q_{1-2} = \Delta s_{1-2}T \tag{4.30}$$

$$Q_{1-2} = mT(s_2 - s_1) \tag{4.31}$$

Diagrama Temperatura vs Entropía ($T - S$), Diagrama de Calor

Al ser la entropía una propiedad termodinámica, puede ser usado como coordenada de otras propiedades, en este caso de la temperatura absoluta (T).

Un proceso ó evolución llamado también **Diagrama de Calor** por tener una representación del calor tomada o cedida o transformada.

En el gráfico, podemos afirmar que: El área bajo la curva $T - S$ representa el calor Q absorbido ($+$ en sentido de 1 a 2), ó el calor cedido ($-$ en sentido de 2 a 1), de donde:

$$dQ = TdS \;\Rightarrow\; \Delta Q_{1-2} = \int_1^2 TdS = T(S_2 - S_1)$$

como $S = ms$, entonces

$$\Delta Q_{1-2} = mT(s_2 - s_1) \;\Rightarrow\; m\Delta q_{1-2} = mT(s_2 - s_1) \;\Rightarrow\; \Delta q_{1-2} = T\Delta s_{1-2}$$

$$\Delta s_{1-2} = \frac{\Delta q_{1-2}}{T} \tag{4.32}$$

Si el proceso es de 1 a 2 entonces como $s_1 < s_2 \Rightarrow Q_{1-2} = mT(s_2 - s_1)$ (calor absorbido)
Si el proceso es de 2 a 1 entonces $s_1 < s_2 \Rightarrow Q_{1-2} = -mT(s_2 - s_1)$ (calor cedido)